

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Experimentální ověření charakteristik pneumatických
membránových motorů

Experimental Verification of the Characteristics of Pneumatic
Diaphragm Motors

Student:
Vedoucí bakalářské práce:

Petr Hanák
Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání bakalářské práce

Student:

Petr Hanák

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma:

Experimentální ověření charakteristik pneumatických membránových motorů

Experimental Verification of the Characteristics of Pneumatic Diaphragm Motors

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte přehled prvků, jejichž součástí je membrána.
- 2) Popište konstrukce a charakteristiky membránových pneumatických motorů.
- 3) Popište měřicí zařízení a snímače a navrhnete metodiku měření.
- 4) Proveďte měření charakteristik vybraných motorů a vyhodnoťte výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training – Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.

BEATER, P. *Pneumatic drives: system design, modelling and control*. Berlin: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3-540-69470-0

KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. – Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TUO, 1996. 267 s. ISBN 80-7078-306-0

Firemní podklady SMC, Festo, Bosch Rexroth, Parker a další.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



Kozubková

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

Hlavatý

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou Bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literatury.

V Ostravě dne 16. května 2013




Petr Hanák

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, který byli VŠB-TU na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16. května 2013



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Petr Hanák

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Pod Kosířem 48, 796 01 Prostějov

Anotace bakalářské práce

Hanák, P. Experimentální ověření charakteristik pneumatických membránových motorů: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2013, 47 s. Vedoucí práce: Dvořák, L.

Bakalářská práce se zabývá přehledem prvků, ve kterých je použita membrána a v další části je zaměřena na základní výpočtové vztahy pro návrh membránového pneumatického motoru a zhodnocení katalogových informací uvedených výrobcí.

V dalších částech je bakalářská práce zaměřena na návrh metodiky a zkušebního zařízení. Navrhl jsem měřicí metodiku dle dostupných měřících přístrojů a snímačů, jejich rozsahu a následně popsal samotné měření, kde jsou vyhodnoceny proměřené charakteristiky membránového pneumatického motoru.

Annotation of bachelor thesis

Hanak, P. Experimental Verification of Characteristics of a Pneumatic Diaphragm Motors:

Bachelor thesis, Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2013, 47 p. Thesis supervisor: Dvorak, L.

This thesis describes the theory, design, use and availability of the pneumatic diaphragm motor along with the design, implementation and measurement of a custom pneumatic diaphragm motor.

First the paper describes the equations employed by the motor, the specific use cases for the motor and then evaluates catalog information listed by manufacturers.

The remainder of the thesis focuses on the design methodology and test equipment of a custom motor which was created using available devices and sensors. A new measurement comparison methodology is described which was formulated according to the specific components. The measurements are then described and evaluated according to the characteristics and attributes of the custom motor.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	9
1. Přehled pneumatických prvků s vestavěnou membránou	10
1.1. Zpětné ventily	10
1.2. Redukční ventily	10
1.3. Rychlo odvětrávací ventil	11
1.4. Pohony armatur	12
1.5. Membránové čerpadlo	12
1.6. Membránový kompresor	13
1.7. Elektropneumatický převodník	13
2. Konstrukce membránových pneumatických motorů	14
2.1. Materiál motorů	16
2.2. Membrány	17
2.3. Charakteristiky membránových pneumatických motorů	18
2.3.1. Charakteristika zdvihu a síly	18
2.4. Základní výpočtové vztahy pro stanovení charakteristik pneumatického motoru	19
2.4.1. Výhody a nevýhody membránového pneumatického motoru	19
2.4.2. Základní výpočtové vztahy	19
2.4.3. Výpočet geometrického objemu	23
3. Popis zkušebního zařízení pro měření charakteristik membránového pneumatického motoru	25
3.1. Rozbor nezbytnosti měření	25
3.2. Zkušební zařízení zatěžováno hmotnou zátěží spolu s protitlakem měchového motoru	26
3.3. Popis snímačů	28
3.4. Použité snímače pro měření	28

3.4.1.	Snímač tlaku.....	28
3.4.2.	Snímač síly.....	29
3.4.3.	Snímač dráhy.....	30
3.5.	<i>Alternativní provedení měřícího zařízení.....</i>	<i>30</i>
4.	Měření charakteristik vybraných motorů a vyhodnocení výsledků.....	32
4.1.	<i>Parametry měřených motorů:</i>	<i>34</i>
4.2.	<i>Naměřené charakteristiky</i>	<i>35</i>
4.2.1.	Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm s vratnou pružinou:	35
4.2.2.	Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm bez vratné pružiny:	36
4.2.3.	Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm s pružinou: ...	37
4.2.4.	Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm bez pružiny: ..	38
4.3.	<i>Teoretický vliv pružiny</i>	<i>39</i>
4.3.1.	Charakteristika pro menší membránový pneumatický motor:	39
4.3.2.	Charakteristika pro větší membránový pneumatický motor:	40
4.4.	<i>Charakteristika membrány.....</i>	<i>41</i>
4.4.1.	Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm:.....	41
4.4.2.	Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm.....	42
5.	Závěr.....	44
6.	Seznam použité literatury.....	46
7.	Seznam obrázků	47

Seznam použitých značek a symbolů

symbol	význam	jednotka
a_1	poměr d/D	[1]
d	průměr opěrné desky	[mm]
d_1	průměr pístnice	[mm]
d_T	průměr vstupního kanálu mamb. Motoru	[mm]
g	gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
n	počet zdvihů	[1]
p_1	přetlak vzduchu	[MPa]
r	poloměr opěrného disku	[mm]
s	tloušťka membrány	[mm]
t	čas	[s]
v_T	zvolená rychlost stlačeného vzduchu	$[m \cdot s^{-1}]$
D_1	průměr membrány	[mm]
D	průměr	[mm]
F	výsledná síla	[N]
F_2	Síla působící na podpěrnou desku membrány	[N]
F_z	daná síla	[N]
F_p	síla pružiny	[N]
H	zdvih membrány	[m]
Q	průtok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
R	poloměr membrány	[mm]
R_0	třecí odpor	[1]
V_g	geometrický objem	$[m^3]$
π	Ludolfovo číslo	[1]
ρ	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
τ	přípustné namáhání membrány	[MPa]
Δp	tlakový spád	[MPa]

Úvod

Membrány jsou součástí řady tekutinových prvků jako např. rozváděčů, tlakových ventilů, tlakoměrů a samozřejmě také membránových pneumatických motorů.

Téma této práce bylo zvoleno z důvodu, že problematika membránových pneumatických motorů není ze strany výrobců moc podepřena technickou specifikací, obzvláště co se charakteristiky týče.

Existuje několik typů pneumatických membránových motorů, které se liší svojí konstrukcí, parametry a výrobcí. Mezi nejvýznamnější výrobce lze zařadit firmy PARKER, BOSCH REXROTH, FESTO a další.

Charakteristiky těchto motorů jsou nejčastěji dvojího typu a to dle jejich konstrukce, kdy v prvním případě pracuje pouze membrána bez podpěry membrány a v druhém případě membrána zajišťuje pouze funkci těsnění a sílu přenáší činná plocha, většinou ocelová, která je pod membránou.

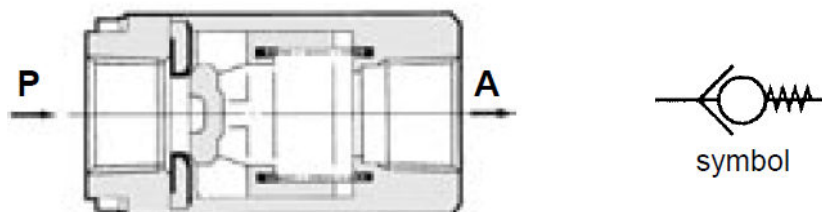
Pro tuto práci byli vytyčeny následující cíle:

- vypracovat přehled prvků, ve kterých je použita membrána,
- provést návrh metodiky měření, zvolení správných snímačů s optimálním rozsahem v závislosti na dostupné technice ve školních laboratořích,
- provést měření vybraných membránových motorů,
- vyhodnotit výsledky měření.

1. Přehled pneumatických prvků s vestavěnou membránou

1.1. Zpětné ventily

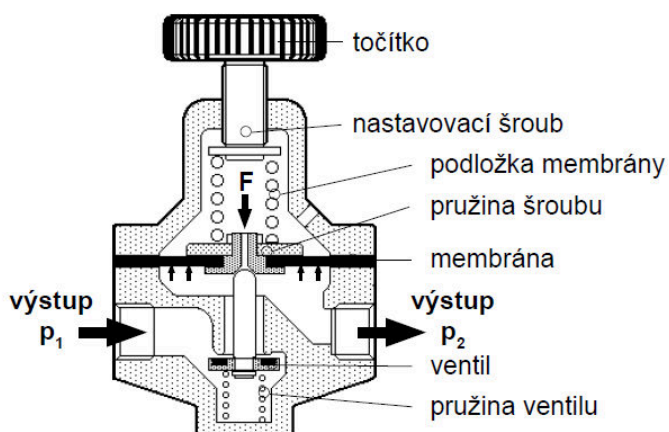
Ventily sloužící pro uzavírání proudu vzduchu v jednom směru. Konstrukčně jsou naprosto jednoduché. Membrána je při zpětném pohybu vzduchu přitlačena na dosedací plochu a tím dojde k těsnění.



Obrázek 1.1 – Zpětný ventil [6]

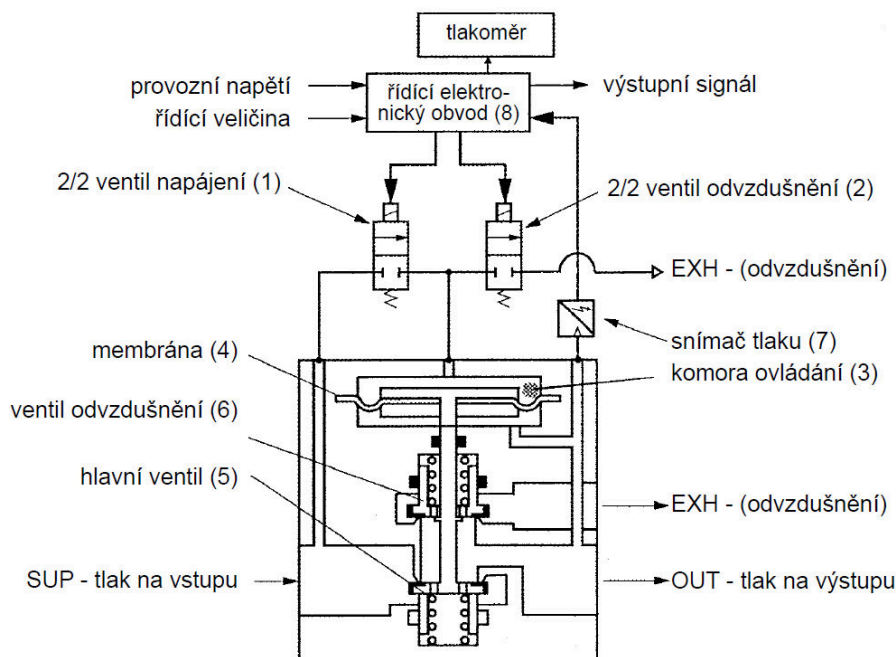
1.2. Redukční ventily

Membrána plní funkci reduktoru tlaku. Při dosažení vyššího tlaku než je tlak nastavený dojde k nadzvednutí membrány a k uťouknutí vzduchu, kdy výstupní tlak je srovnán s tlakem nastaveným. Nastavování tlaku se realizuje pomocí otáčení šroubu, který stlačuje pružinu proti membráně.



Obrázek 1.2 – Redukční ventil [6]

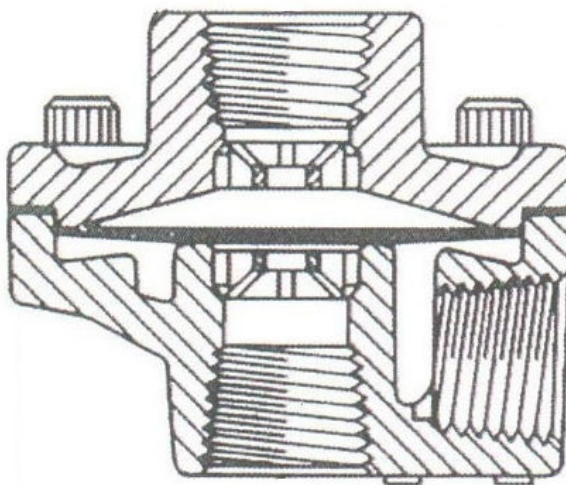
Dalším příkladem je redukční ventil elektricky ovládaný. Na rozdíl od předchozí konstrukce je v tomto případě místo pružiny požadovaná hodnota tlaku regulována tlakovým vzduchem nad membránou.



Obrázek 1.3 – Redukční ventil [6]

1.3. Rychlo odvětrávací ventil

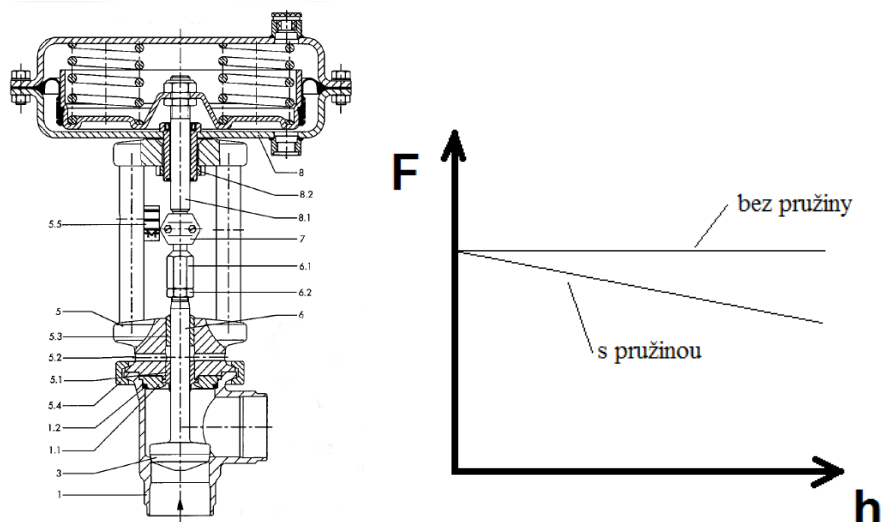
Využitelný např. pro zpětný pohyb pístu u přímočarého pneumatického motoru. Při plnění motoru je membrána dotlačována do sedla a při pohybu zpět je odtlačena. Tím dojde k rychlému odvětrání přes tlumič hluku.



Obrázek 1.4 – Rychlo odvětrávací ventil [6]

1.4. Pohony armatur

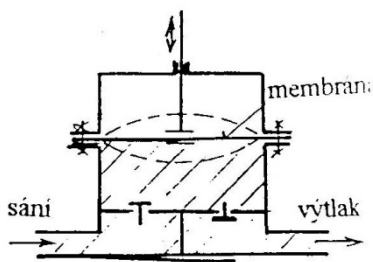
Jsou používány v proporcionální technice k rychlému a přesnému seřizování průtoku média. Mohou být jednočinné nebo dvojčinné a v závislosti na tom je pro konstrukci uvedenou na obr. 1.5 charakteristika lineární se silou nezávislou na zdvihu, nebo se síla mění v závislosti na zdvihu vlivem tuhosti pružiny.



Obrázek 1.5 – Servoventil s charakteristikou [6]

1.5. Membránové čerpadlo

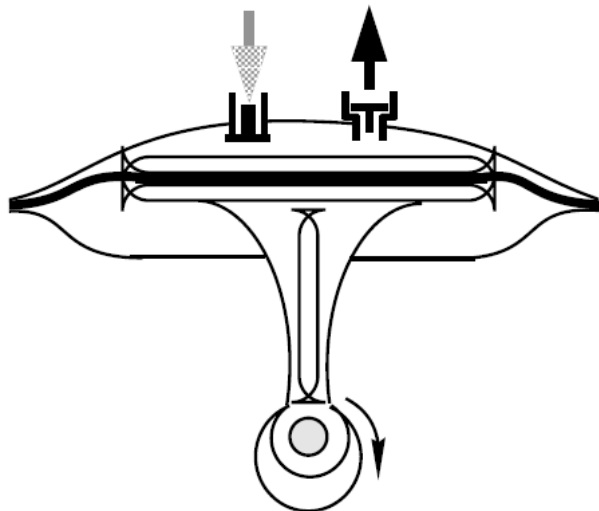
Využívá membránu k čerpání kapalin, je samonasávací. Má možnost běhu naprázdno bez poškození a též regulace výkonu. Je poháněno tlakovým vzduchem, který nesmí obsahovat kapalnou vodu. Jeho výhodou je naprosto čistý a tichý chod. Při čerpání vznikají tlakové pulzace, jejichž intenzita stoupá v závislosti na velikosti čerpadla. Proto je většinou třeba instalovat prvek (zásobník), který toto kompenzuje, aby nedocházelo k poškozování následujících regulačních prvků. Doporučená eliminace rázů je připojením přes pružný element (hadici).



Obrázek 1.6 – Membránové čerpadlo [3]

1.6. Membránový kompresor

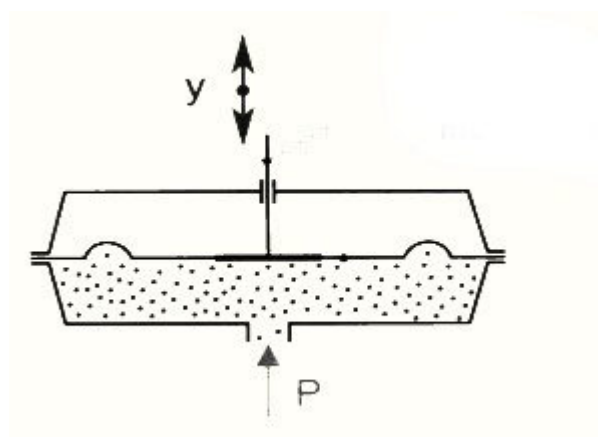
Má velké využití ve farmaceutickém a potravinářském provozu. Výhodou je naprosto čistý stlačený vzduch bez stop po oleji a velice tichý chod. Nevýhodou je, při srovnatelných rozměrech s pístovými, malá výkonnost.



Obrázek 1.7 – Membránový kompresor [3]

1.7. Elektropneumatický převodník

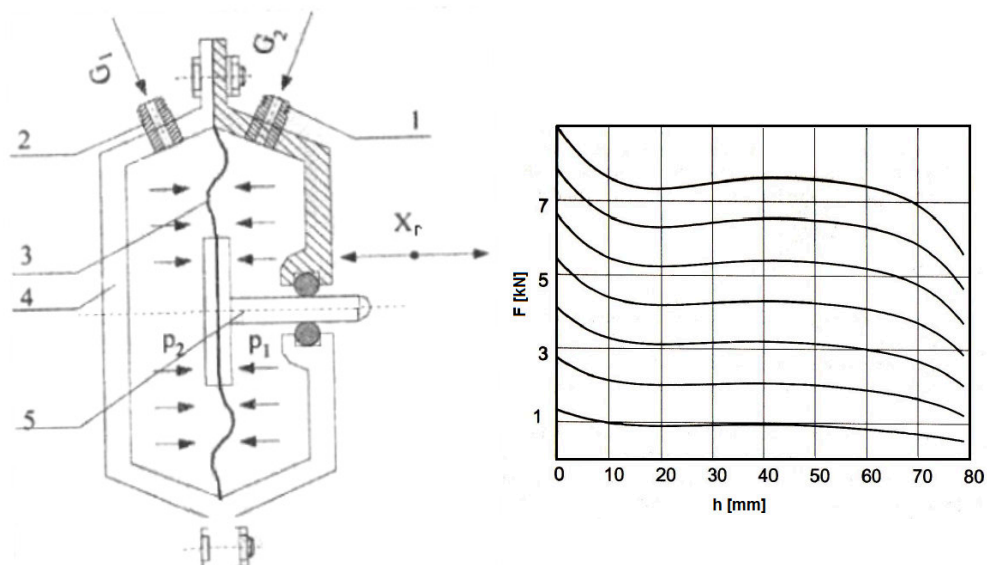
Působením tlaku p se membrána deformuje a posouvá pístnici. Posunutí pístnice je úměrné velikosti tlaku. Membrána může být kovová (ocel) pro tlaky do 250 kPa nebo gumová pro tlaky do 10 kPa. Tohoto se využívá v některých typech tlakoměrů.



Obrázek 1.8 – Elektropneumatický převodník [3]

2. Konstrukce membránových pneumatických motorů

Hlavní součásti membránového pneumatického motoru jsou pístní tyč, membrána a přední a zadní víko.



Obrázek 2.1 – Řez membránového motoru s charakteristikou [8,1]

Port pro připojení vzduchu v předním víku

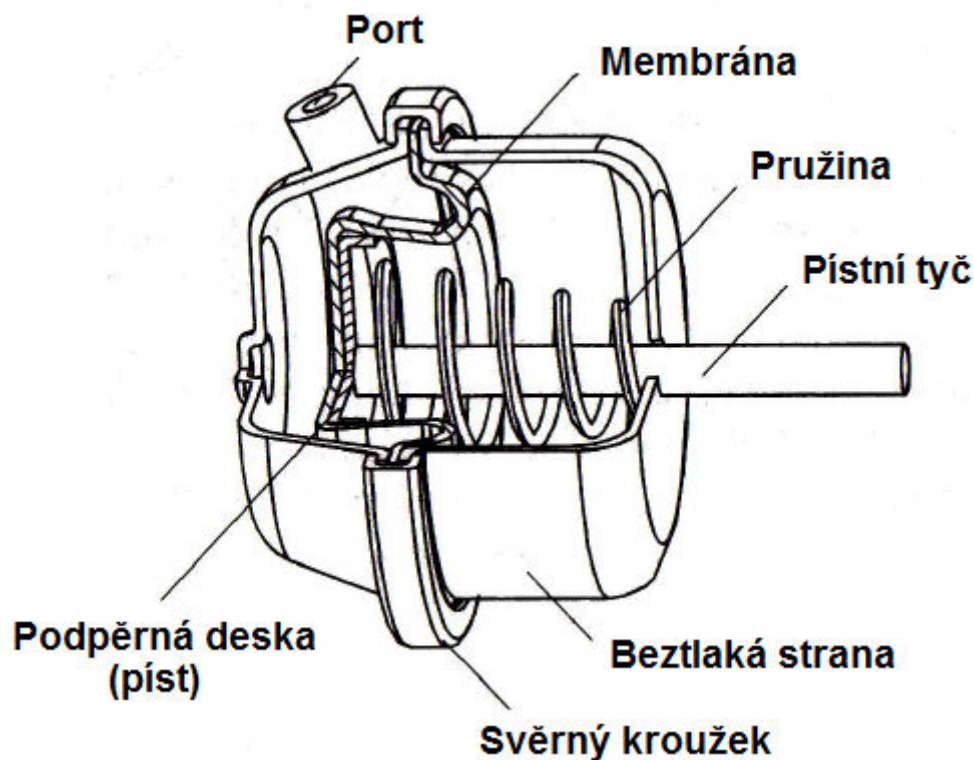
1. Port pro připojení vzduchu v předním víku
2. Port pro připojení vzduchu v zadním víku
3. Membrána
4. Zadní víko
5. Pístní tyč



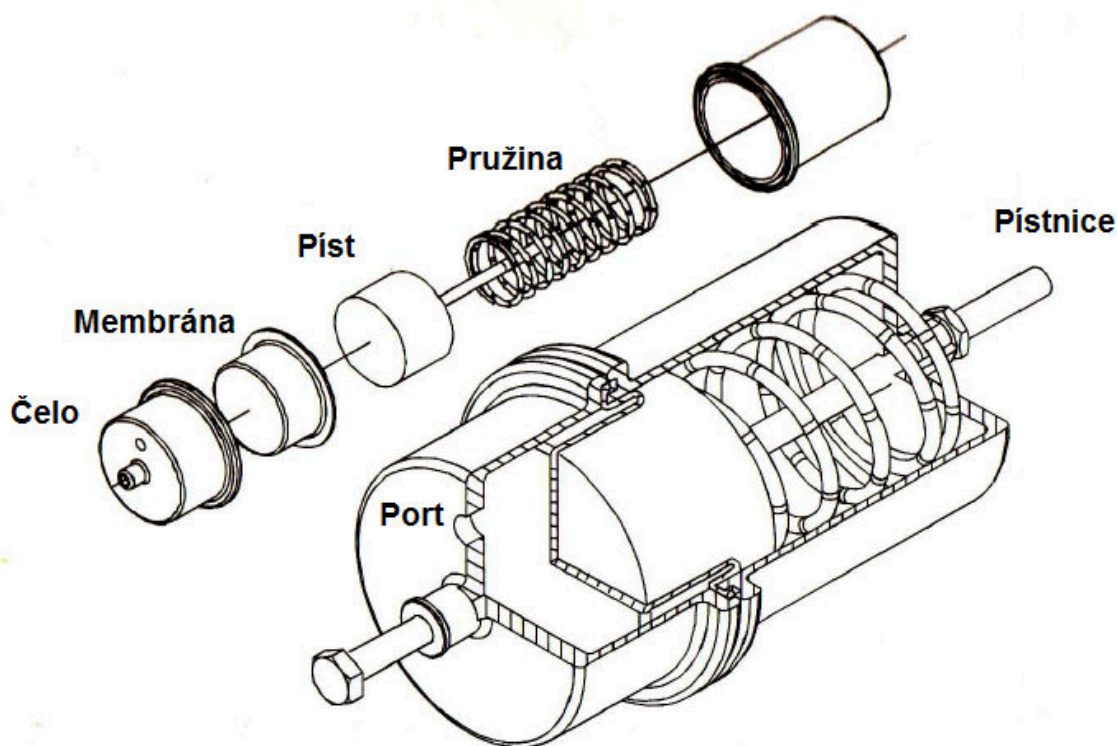
Obrázek 2.2 – Rozmontovaný membránový pneumatický motor

Konstrukce membránového pneumatického motoru obrázku 2.1 a 2.2 nemá díky absenci podpěrné desky (pístu, viz. konstrukce níže) lineární závislost vyvozující síly na zdvihu. Nelinearita je způsobena deformací membrány, k čemuž se využívá část tlakové energie přivedené do motoru. Díky tomu se nehodí pro aplikace, jako jsou brzdné nebo regulační systémy. Vhodná by však byla u systému, kde by tento membránový pneumatický motor sloužil např. jako nouzové zavírání šoupátka, kdy by motor měl pouze dva provozní stavy a to v základní poloze nebo úplně vysunut. Díky vratné pružině, by mohl být použit tak, že pokud by v systému klesl provozní tlak, motor by se automaticky vrátil do výchozí polohy a otevřel naplno uzavírací šoupátko.

Mezi druhé konstrukční provedení řadím membránové pneumatické motory, které využívají mezi membránou a pístnicí podpěru pomocí ocelové nádoby. Ta přebírá funkční plochu membrány a tak nedochází k pružným deformacím membrány na tak velké ploše. Zdvih je úměrný (po odečtení účinnosti) vyvozující síle. Membrána v tomto případě plní funkci pouze jako těsnění motoru, a tak je tento motor i při delším používání pořád naprosto těsný a díky lineárnímu zdvihu vhodný pro aplikace, kde je nutné znát, na základě síly, změnu zdvihu. Mezi nejčastější aplikace lze jmenovat brzdné systémy nákladních vozidel, regulační prvky průtoku a další.



Obrázek 2.3 – Řez membránovým pneumatickým motorem s podpěrnou deskou [1]



Obrázek 2.4 – Řez membránovým pneumatickým motorem s podpěrným pístem [1]

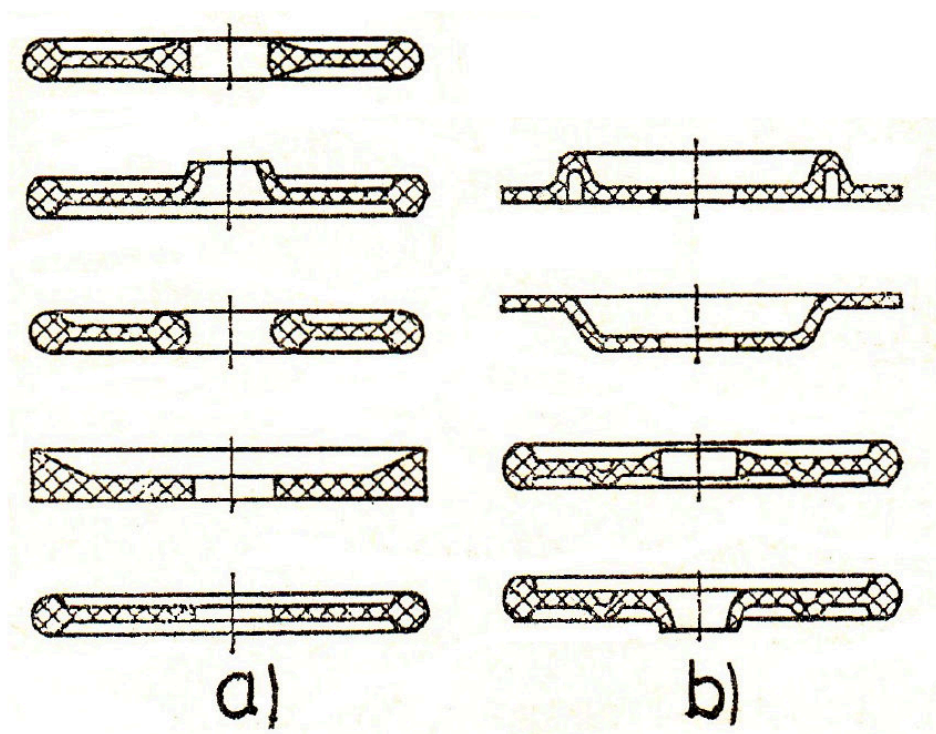
2.1. Materiál motorů

Materiál pístní tyče je zpravidla válcovaná ocelová tyč. Mezi alternativní materiály patří hliník nebo tažený speciální hliníkový profil s velmi kvalitní povrchovou úpravou.

Přední a zadní víko bývá odléváno z temperované litiny, hliníku nebo z ocelových výtažků, které jsou na sebe našroubovány popř. spojeny spojovacími šrouby.

2.2.Membrány

Jsou většinou vyrobeny z pryže typu NBR s jednou textilní vložkou. Dalšími možnostmi jsou materiály oboustranně pokryté vrstvou elastomeru jako CR, EPDM, FKM, aj. Membrány se dělí svým tvarem dle zdvihu motoru. Toto dělení je zobrazeno na obrázku 2.5.

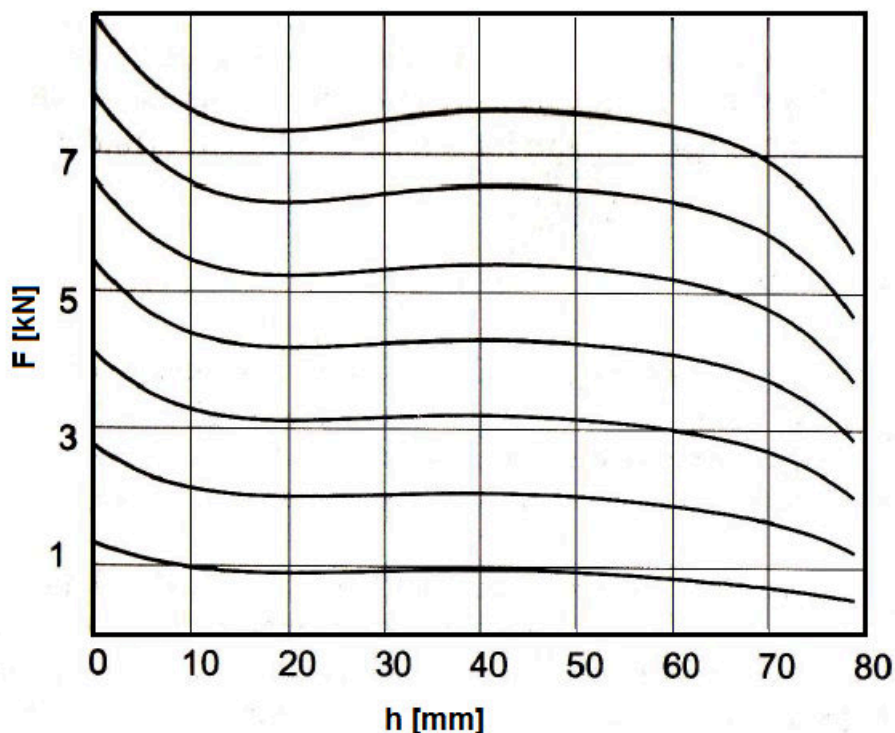


Obrázek 2.5 - Jednotlivé tvary provedení membrán [12]

a) ploché membrány, b) talířové membrány

2.3.Charakteristiky membránových pneumatických motorů

2.3.1. Charakteristika zdvihu a síly



Obrázek 2.6 – F-h charakteristika [1]

Výše uvedená charakteristika zatěžování membránových pneumatických membránových motorů nám jasně ukazuje, že vzhledem k použití pružné membrány dochází se zvyšujícím se tlakem k rozpínání membrány. Tudíž není tlak přímo úměrný zdvihu, ale závisí též na tuhosti membrány.

Jednotlivé křivky v uvedené charakteristice jsou rozdílné, což je zapříčiněno tím, že každá křivka odpovídá jinému pracovnímu tlaku motoru.

Jednou z výjimek, kde je tato závislost lineární je speciální konstrukce tohoto motoru, kde je membrána podepřena podpěrnou deskou. V tomto případě má jen minimální plocha membrány možnost se vydouvat a tím posouvat charakteristiku.

2.4. Základní výpočtové vztahy pro stanovení charakteristik pneumatického motoru

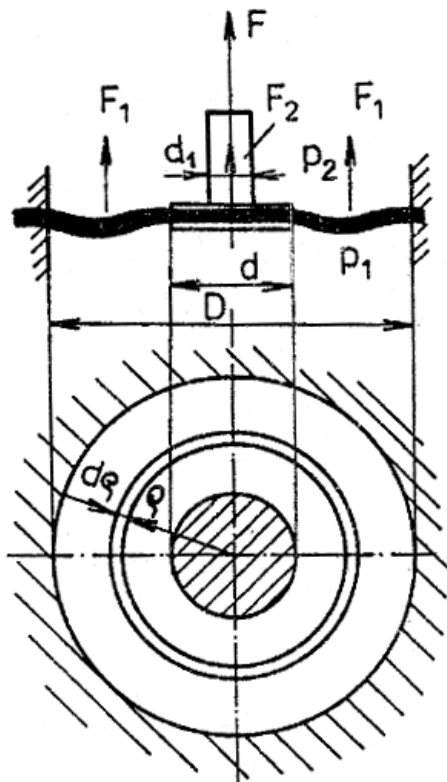
2.4.1. Výhody a nevýhody membránového pneumatického motoru

Přímočarý membránový pneumatický motor má jisté výhody oproti pístovému motoru. Mezi hlavní výhody patří jeho jednoduchá konstrukce nenáročná na přesnost výroby a jeho absolutní těsnost, která obzvláště u jednočinného motoru zůstává zachována po celou dobu jeho životnosti. Mezi další výhodu lze uvést poměrně větší vyvozuující sílu, avšak tato vlastnost je vykompenzována nízkou životností membrány. U většiny membránových motorů, které nemají membránu podepřenou podpěrnou deskou (pístem) je též nevýhoda proměnlivé síly v závislosti na zdvihu.

2.4.2. Základní výpočtové vztahy

Níže uvedené výpočtové vztahy byly převzaty ze skript, která jsou uvedeny v seznamu literatury pod číslem [8].

Hlavní výpočtový parametr je aktivní průměr membrány (v místě upevnění) a je zobrazen na obrázku 2.7:



Obrázek 2.7 – Náskres k základním výpočtům [8]

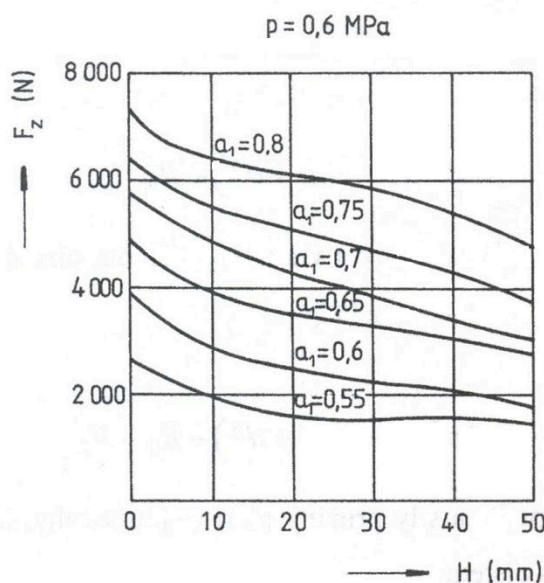
Výpočet pro bezpístnicovou stranu:

$$D = 1,95 \cdot \sqrt{\frac{F_z}{(1 + a_1 + a_1^2) \cdot p_1}} \text{ [mm]} \quad (3.1)$$

Výpočet pro stranu s pístnicí:

$$D = 1,95 \cdot \sqrt{\frac{F_z + 0,785 \cdot p_1 \cdot d_1^2}{(1 + a_1 + a_1^2) \cdot p_1}} \text{ [mm]}, \quad (3.2)$$

kde F_z [N] je daná síla, p_1 [MPa] je mezní přetlak vzduchu, d_1 [mm] je průměr pístnice, d [mm] je průměr opěrného disku, D [mm] je průměr membrány a a_1 [1] je poměr průměru opěrného disku a průměru membrány, který se volí v rozmezí 0,6 až 0,8. Při menší hodnotě a_1 je síla v pístnici v průběhu zdvihu méně proměnná, ale aktivní průměr membrány je menší a tím menší je i šířka. To vidíme na obrázku 2.8:



Obrázek 2.8 – Charakteristiky různých tvarů membrán [8]

Tloušťka membrány se vypočte ze vztahu

$$s = 0,175 \cdot \frac{p_1 \cdot D \cdot (1 - a_1^2)}{\tau} \text{ [mm]}, \quad (3.3)$$

kde τ je přípustné smykové namáhání membrány, které lze volit v rozmezí 2,2 až 3 MPa.

Při konstrukci membránového pneumatického motoru můžeme vypočítat sílu v pístnici postupně. Zanedbáme deformaci membrány roztažením a budeme předpokládat, že tlak z elementární plochy $2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho$ se přenáší na desku pístnice v poměru ramen:

$$\frac{R - \rho}{R - r}, \quad kde \quad R = \frac{D}{2} \quad a \quad r = \frac{d}{2} \quad (3.4)$$

Síla přenášená z membrány na desku pístnice se vypočte z elementární plochy a tlakového spádu $\Delta p = p_1 - p_2$ při $p_1 > p_2$ jako:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{2 \cdot \pi}{R - r} \cdot \int_r^R \Delta p \cdot (R - \rho) \cdot \rho \cdot d\rho \\ &= \frac{\pi}{12} \cdot \Delta p \cdot (D^2 + D \cdot d - 2 \cdot d^2) \text{ [N]} \end{aligned} \quad (3.5)$$

a síla, působící bezprostředně na podpěrnou desku pístnice pak je:

$$F_2 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \Delta p \text{ [N]} \quad (3.6)$$

Výsledná tlačná síla je dána součtem sil F_1 a F_2 , zmenšeným o sílu R_0 , představující třecí odpor těsnění pístnice:

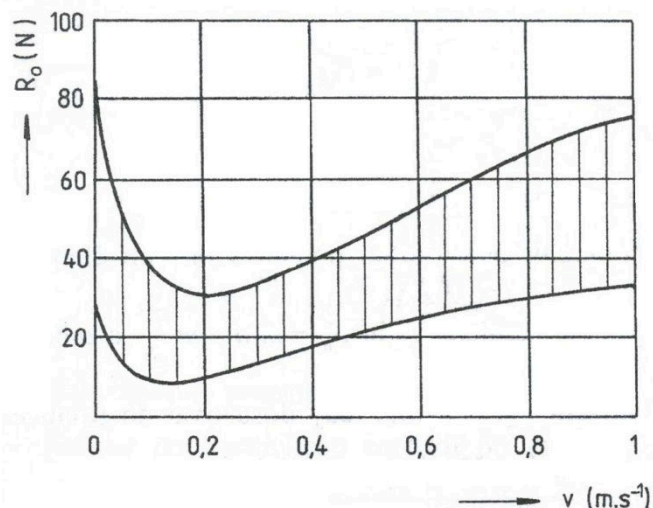
$$F = \frac{\pi}{12} \cdot \Delta p \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2) - R_0 \text{ [N]} \quad (3.7)$$

Bude-li membránový motor jednočinný s vratnou pružinou, bude rovnice na pravé straně doplněna o sílu pružiny F_p , tedy:

$$F = \frac{\pi}{12} \cdot \Delta p \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2) - R_0 - F_p \text{ [N]} \quad (3.8)$$

Pro výpočet třecího odporu R_0 a síly pružiny platí stejné vztahy, jako pro přímočarý pneumatický motor s pístem.

Z experimentálního výzkumu různých typů těsnění vychází následující graf (obrázek 2.9) závislosti pasivního odporu R_0 na rychlosti pístu, z něhož je patrna oblast zvýšeného odporu R_0 při začátku pohybu pístu, nebo při malých rychlostech, kde se uplatňuje přechod z kluzného na kapalinné tření. Také doba klidu motoru má vliv na vzrůst odporu R_0 .



Obrázek 2.9 – Graf závislosti pasivního odporu na rychlosti [8]

Je patrné, že výpočet pasivního odporu R_0 podle uvedené rovnice je dost přibližný, proto se velmi často, a to s dostatečnou přesností, nahrazuje pasivní odpor R_0 jistou částí zatěžující síly F_z pomocí součinitele a , který můžeme vyjádřit vztahem:

$$R_0 = a \cdot F_z \quad (3.9)$$

Součinitel se volí v rozmezí $0,1 \div 0,3$.

Jelikož uvádím výpočet pro jednočinný motor, musíme brát v úvahu, že pružina, která zabezpečí vrácení pístu do výchozí polohy, musí mít rezervu až 15% pro pokrytí ztrát v těsnění pístu

$$F_p = (1,1 \text{ až } 1,15) \cdot R_0 = (1,1 \text{ až } 1,15) \cdot \pi \cdot D \cdot b_1 \cdot f_0 \cdot p_1 [\text{N}], \quad (3.10)$$

kde tlak p_1 na straně pístu při výfuku do atmosféry je $p_1 = 0$ MPa a při výfuku do vedení a přes řídicí rozvaděč je $p_1 = 0,04$ až $0,08$ MPa.

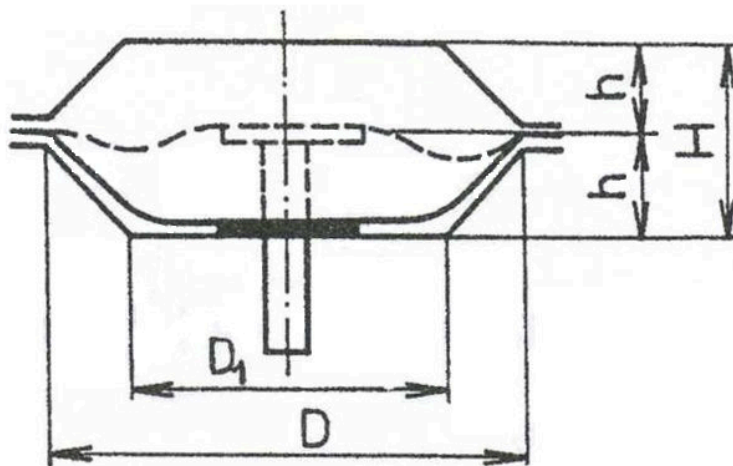
Výsledná tažná síla bude menší o plochu pístnice a bude také platit $\Delta p = p_2 - p_1$, neboť $p_2 > p_1$

$$F = \frac{\pi}{12} \cdot \Delta p \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2) - R_0 - \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 [\text{N}], \quad (3.11)$$

kde d_1 je průměr pístnice.

2.4.3. Výpočet geometrického objemu

Geometrický objem V_g pracovního prostoru membránového pneumatického motoru můžeme stanovit za předpokladu, že zdvih membrány H , tj. zdvih pístu, je určen dvojnásobnou výškou h pracovního prostoru nad a pod membránou, a že se jedná o dvojnásobný objem komolého kužele s průměrem menší základy D_1 a větší základy D . Nákres k výpočtu je na obrázku 2.10, kde $H = 2 \cdot h$.



Obrázek 2.10 – Nákres pro výpočet geometrického objemu [8]

Výpočet geometrického objemu:

$$V_g = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot H \cdot (D^2 + D \cdot D_1 + D_1^2) \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.12)$$

Spotřeba vzduchu při n zdvizech přepočítaná na nasávaný tlak:

$$Q_N = V_g \cdot n \cdot \frac{p_1}{p_0} \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (3.13)$$

Čas, potřebný k vykonání jednoho zdvihu lze vypočítat z rovnice kontinuity, psané ve tvaru

$$Q = \frac{V_g}{t} = A_T \cdot v_T = \frac{\pi}{4} \cdot d_t^2 \cdot v_T \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (3.14)$$

odkud

$$t = \frac{2 \cdot H \cdot (D^2 + D \cdot D_1 + D_1^2)}{3 \cdot d_T^2 \cdot v_T} [\text{s}] \quad (3.15)$$

kde d_T je průměr potrubí či vstupního kanálu motoru a v_T je zvolená rychlost stlačeného vzduchu v potrubí v rozmezí 10 až $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Zdvih motoru H je závislý na průměru a konstrukci membrány a volí se u plochých membrán $H = (0,18 \text{ až } 0,22) \cdot D$ a u membrán zvlněných – talířových $H = (0,25 \text{ až } 0,35) \cdot D$.

3. Popis zkušebního zařízení pro měření charakteristik membránového pneumatického motoru

3.1. Rozbor nezbytnosti měření

Zkušební zařízení slouží k ověření hlavních parametrů membránového pneumatického motoru, které lze následně porovnávat s vypočtenými nebo katalogovými hodnotami dodanými výrobcem daného membránového pneumatického motoru, případně doplnit informace o chování motoru, protože výrobci ne vždy uvádějí všechny potřebné údaje či charakteristiky.

Pomineme-li uvedené rozměrové a montážní rozměry, pak výrobce dodává jen velice málo parametrů k daným membránovým pneumatickým motorům. To je patrné z obrázku 3.1. Proto bylo rozhodnuto k proměření charakteristik dvou membránových pneumatických motorů a to navíc jak s osazenou pružinou, která vrací motor do základní polohy, tak i bez pružiny, abychom mohli zjistit jaký vliv má pružina na výslednou vyvozuující sílu na zdvihu.

Membránový a pístový válec, Série 102
 ▶ Ø 60 - 250 mm ▶ Připoje: G 1/4 - G 1/2 ▶ Jednočinný, bez tlaku zasunutý ▶ Pístní tyč: Vnější závit ▶ Jemný závit

Rexroth
Bosch Group

	Připoj stlačeného vzduchu	Vnitřní závit
Provozní tlak min./max		2 bar / 8 bar
Teplota okolí min./max.		-20°C / +70°C
Teplota média min./max.		-20°C / +70°C
Médium		Stlačený vzduch
Max. velikost částic		50 µm
Obsah oleje stlačeného vzduchu		0 mg/m³ - 5 mg/m³
Tlak ke stanovení síly na píst		6 bar

Materiály:

Válcová trubka	Ocel
Pístní tyč	Ocel
Čelní kryt	Ocel
Těsnění	Butadien-akrylonitrilový kaučuk

Technické poznámky

- Tlakový rosný bod musí ležet nejméně 15 °C pod teplotou okolí a média a smí činit max. 3 °C.
- Obsah oleje stlačeného vzduchu musí zůstat po celou životnost konstantní.
- Používejte výhradně oleje schválené firmou Bosch Rexroth, viz kapitola „Technické informace“.
- Zdvihy membránových válců jsou závislé na toleranci.
- Tolerance při zdvihu 40, 50, 80 mm: ± 3 mm
- Tolerance při zdvihu 100 mm: +6/-1 mm

Ø pístu	[mm]	60	80	85	113	160
Síla na píst vysunutí	[N]	1600	3000	3000	6000	12000
Síla pružiny min. - max.	[N]	130 - 320	100 - 300	130 - 320	100 - 650	240 - 1000
Pozn.		-	-	-	-	-
Ø pístu	[mm]	250				
Síla na píst vysunutí	[N]	25000				
Síla pružiny min. - max.	[N]	900 - 2750				
Pozn.		-				

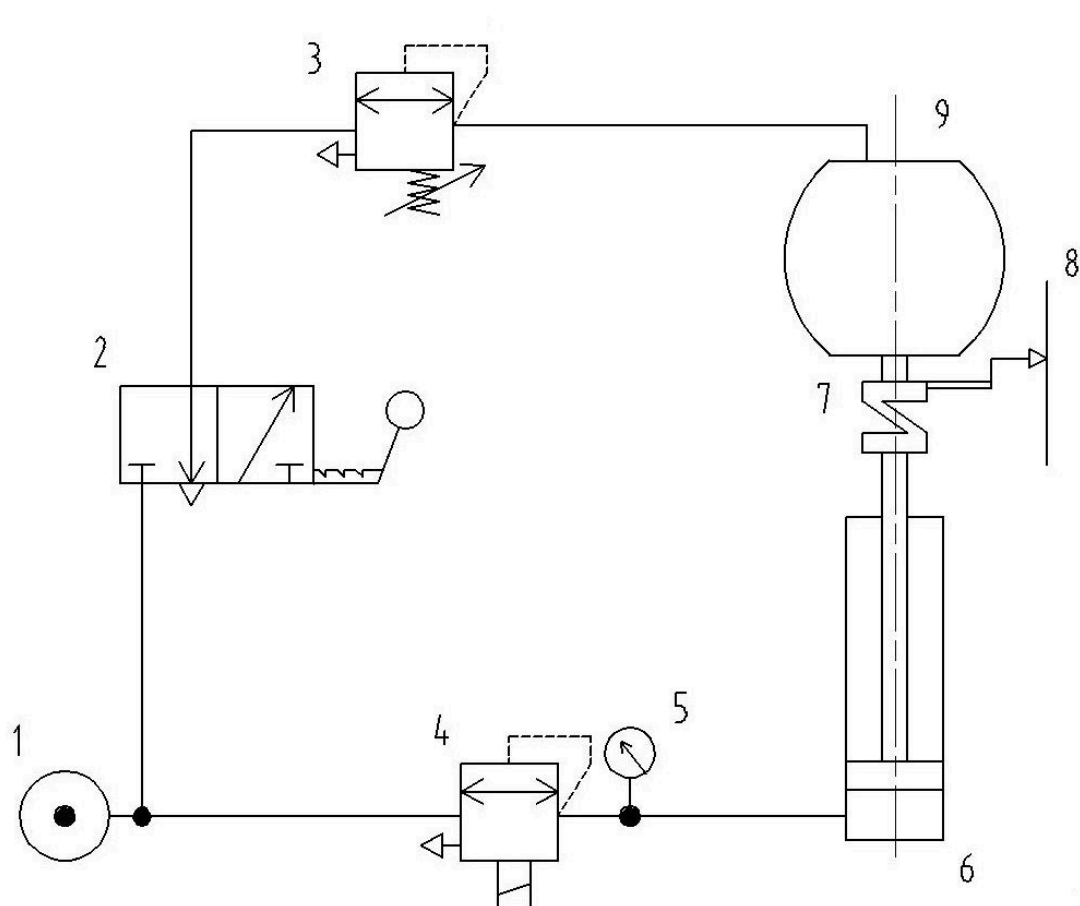
Obrázek 3.1 – Katalogový list BOSCH-REXROTH [2]

3.2.Zkušební zařízení zatěžováno hmotnou zátěží spolu s protitlakem měchového motoru

Navrhované zkušební zařízení pracuje na principu, kdy zkoušený membránový pneumatický motor posouvá ve svislém směru hmotnou zátěž a stlačuje měchový motor, který vytváří protitlak ve svislém směru. Na základě použitého měchového motoru a membránového motoru navíc můžeme pomocí různých výšek závaží nastavit pracovní rozsah měchového motoru, který je nutno omezit, aby nedošlo k jeho poškození. Zařízení je navrženo pro změření charakteristiky membránového pneumatického motoru na základě změny zatěžující síly a zdvihu membránového motoru. Zkušební zařízení je vybaveno snímači dle schématu na obrázku 3.2 a jsou v něm použity následující prvky: zdroj tlaku, multiplikátor tlaku, proporcionální redukční ventil, snímač tlaku, rozváděč 3/2 s aretací polohy, redukční ventil s manometrem, snímač polohy, snímač síly, membránový pneumatický motor a měchový motor.

Jednotlivé snímače jsou zapojeny přes měřicí kartu do PC, které má v programu Matlab Simulink přednastaveno měřící schéma a výsledky jsou následně přeneseny do Matlabu k vyhodnocení. Nastaveno bude 10 sekund pro jednotlivá měření, přičemž se bude brát do statistiky posledních 2000 hodnot při vzorkovací frekvenci 1000 vzorků za sekundu, aby nedošlo k ovlivnění výsledků předchozími nestabilizovanými hodnotami.

Při měření bude nastaven konstantní tlak na membránovém pneumatickém motoru, který bude stabilizován proporcionálním redukčním ventilem, aby bylo možné určit charakteristiku při jednotlivých tlacích. Protitlak se bude postupně snižovat od nejvyšší hodnoty. Měření bude ukončeno, jakmile bude dosaženo maximálního zdvihu membránového pneumatického motoru.



Legenda:

- 1 - zdroj tlaku
- 2 - rozváděč 3/2
- 3 - redukční ventil
- 4 - proporcionální redukční ventil
- 5 - snímač tlaku
- 6 - membránový pneumatický motor
- 7 - snímač síly
- 8 - snímač polohy
- 9 - měchový motor

Obrázek 3.2 – Schéma návrhu měřícího obvodu

3.3. Popis snímačů

Jelikož je nutné zabezpečit, aby bylo možné měření kdykoliv zopakovat za stejných podmínek, je též nutné mít zkalibrované a ocejchované snímače, které mají tuto kalibraci platnou. Na snímače jsou dále kladeny požadavky, které jsou vyjmenovány níže:

- jednoznačná závislost jedné výstupní veličiny na jedné vstupní
- citlivost snímače
- přesnost
- velká časová stálost
- minimální časová konstanta
- minimální závislost na vnějších vlivech
- vlhkost
- prašnost
- minimální vliv na měřený objekt
- maximální spolehlivost

3.4. Použité snímače pro měření

3.4.1. Snímač tlaku

Pro měření absolutní nebo relativní hodnoty tlaku. Nejčastěji Bourdonova trubice. Jsou levné, v různých rozsazích a tělesech. Pro přesnější měření se využívá tenzometrického principu, kdy je např. membrána polepena tenzometry, a na základě změny odporu jsou zaznamenávány změny tlaku. Různé třídy přesnosti a připojovací rozměry. Měří tlak i podtlak, případně diferenci. Při klidném měření se používá cca 2/3

rozsahu, při dynamickém měření polovina rozsahu měřené veličiny.

Zvolen byl typ SMC ISE40-01-62L.



Výrobce: SMC

Typ: ISE40-01-62L

Rozsah: - 0,1 ÷ 1,0 MPa

Reakční doba: max. 2,5 ms

Obrázek 3.3 – Snímač tlaku SMC [13]

3.4.2. Snímač síly

Snímač síly je převodník převádějící sílu, jež na něj působí, na měřitelný elektrický výstup. Ačkoliv existuje mnoho různých snímačů síly, jsou tenzometrické snímače nejrozšířenější. Tenzometrické snímače síly poskytují přesnost od 0,03 % do 0,25 % z celého rozsahu a jsou vhodné pro téměř všechny průmyslové aplikace. **Zvolen byl typ PT4000.**



Výrobce: PT Global

Typ: PT4000

Rozsah: 20 ÷ 5000 kg

Obrázek 3.4 – Snímač síly PT 4000 [11]



Výrobce: DGT

Typ: DGT4AN

Vstup: 0÷5 DC, 0 ÷10 DC

Výstup: 4 ÷ 20 mA

Obrázek 3.5 – Vážní indikátor s analogovým výstupem [5]

3.4.3. Snímač dráhy

Pracují většinou na odporovém principu nebo principu indukčním. Odporové mají dva napájecí vstupy a třetí odporový, který v závislosti na poloze jezdce mění vnitřní odpor snímače a s touto změnou je přímo úměrná poloha jezdce. Snímače jsou velice přesné a odolné proti vibracím. **Zvolen byl typ MegaTron RC13-100-M.**



Výrobce: MegaTron

Typ: RC13-100-M

Rozsah: 0 ÷ 100 mm

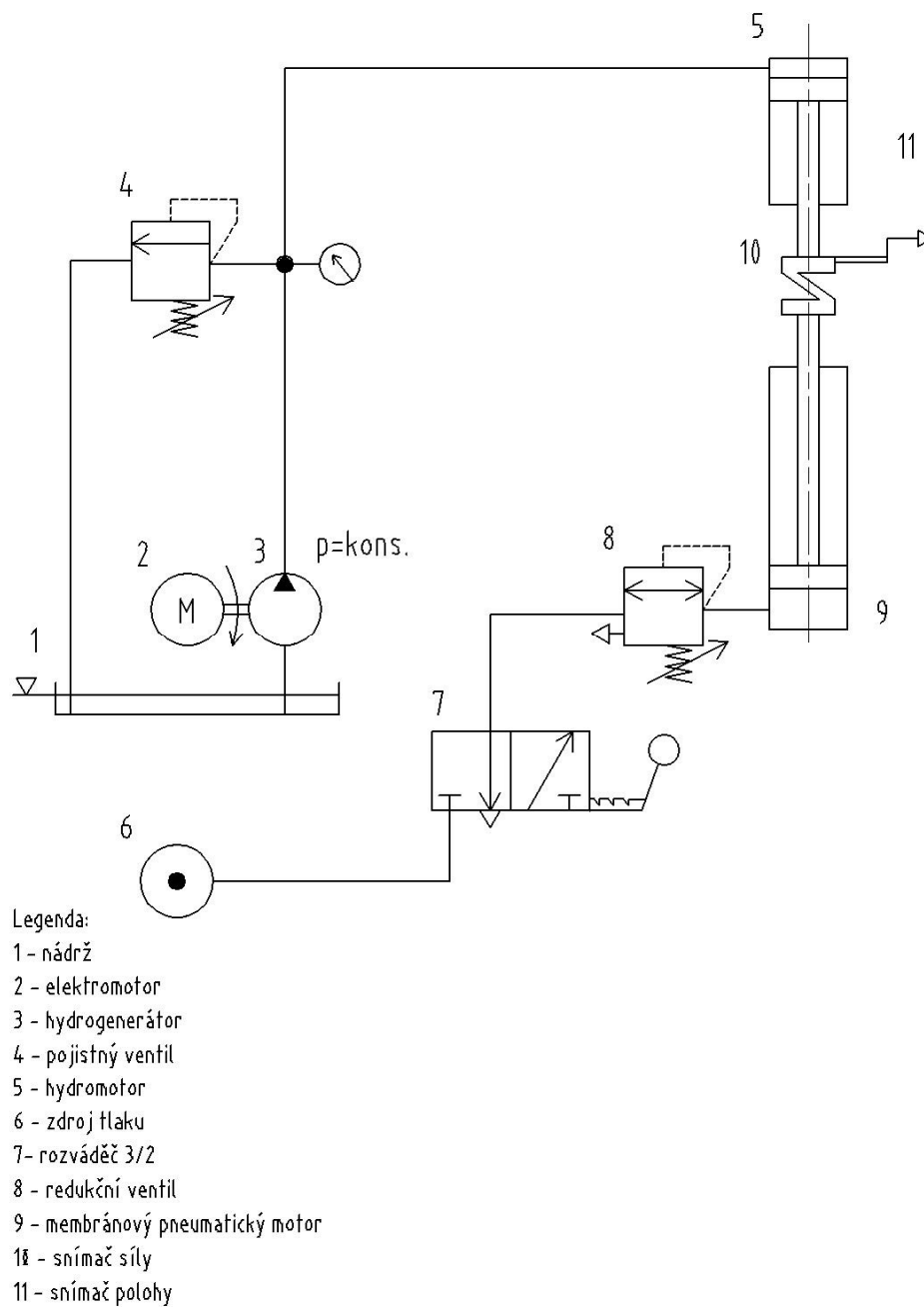
Přesnost: $\pm 0,1\%$

Obrázek 3.6 – Snímač dráhy MegaTron RC13-100-M [9]

3.5. Alternativní provedení měřícího zařízení

V průběhu měření bylo zjištěno, že výše navrhované měřící zařízení je vhodné díky pomalé regulaci proporcionálního redukčního ventilu měřící kartou pouze pro měření statických charakteristik. Aby bylo možné do budoucna proměřovat i dynamické charakteristiky těchto motorů, navrhl jsem složení takového měřícího obvodu, který by mohl sloužit pro měření dynamiky. Schéma tohoto měřícího obvodu je na obrázku 3.7. Hmotná zátěž nepřípadá v laboratorních podmínkách v úvahu, jelikož motor potřebuje při některých pracovních tlacích protitlak odpovídající hmotnému zatížení blízcímu se 1000 kg a tak je vhodnější toto zatížení nahradit hydraulickým obvodem s regulací na konstantní tlak, kde bude stačit přímočarý motor malého zdvihu a průměru spolu s pojistným ventilem a hydrogenerátorem. Ten bude mít geometrický objem v řádu několika málo cm^3 .

V případě potřeby nebude problém daný měřící obvod sestavit, neboť veškeré prvky, které jsou v něm použity lze najít na měřicích stanicích v laboratoři hydrauliky.



Obrázek 3.7 – Schéma alternativního provedení měřicího obvodu

4. Měření charakteristik vybraných motorů a vyhodnocení výsledků

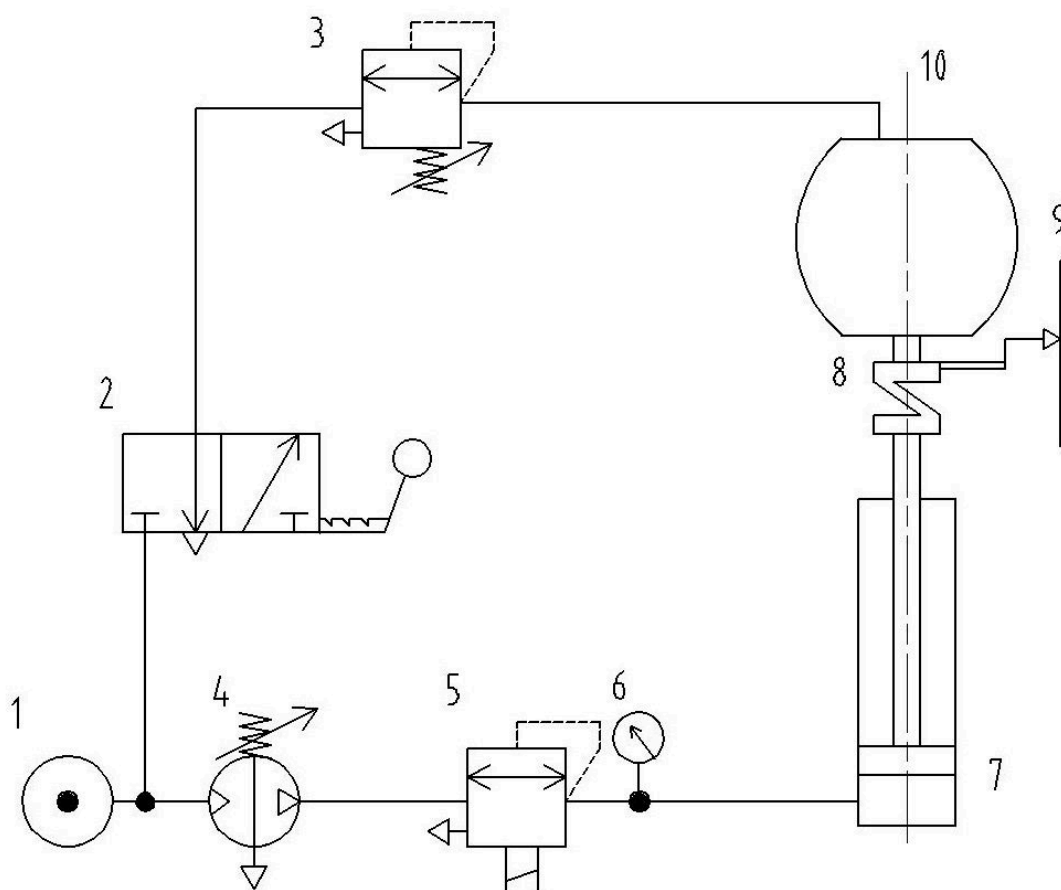
Motory byly proměřeny jak v jednočinném, tak dvojčinném provedení, přičemž tato změna se provedla vyjmutím vratné pružiny. Tím se tedy z jednočinného motoru stal motor dvojčinný.

Měření byly dva membránové pneumatické motory od výrobce BOSCH REXROTH, série 102, přičemž první (menší) měl průměr membrány 80 mm, zdvih 40 mm a druhý (větší) měl průměr membrány 113 mm, zdvih 50 mm.

Měření bylo provedeno dle návrhu výše, avšak při měření bylo zjištěno, že bude výhodnější připojit na vstup do membránového motoru multiplikátor tlaku, aby bylo dosaženo vyššího tlaku při měření a nemuselo docházet, tak k častému spínání kompresoru. Při měření nejvyšších hodnot, tzn. 6 bar, byl multiplikátor zařazen ihned za výstup ze vzdušníku, aby bylo dosaženo vyšší hodnoty tlaku, než kterou nám poskytoval kompresor.

Měření nebylo nakonec realizováno přesně dle plánu, kdy jsem předpokládal, že budou do Matlabu přes měřicí kartu (AD/DA převodník) napojeny všechny snímače. Bohužel došlo před měřením k poškození měřicí karty, a tak bylo možné zaznamenávat pouze dvě hodnoty. Bylo zhodnoceno, že nejlepší bude zaznamenávat hodnotu polohy, která nemá vlastní displej, a tudíž je nutné ji vyhodnocovat přes měřicí kartu. Druhá zaznamenávaná veličina byla hodnota tlaku, jelikož tato byla použita v regulační smyčce, tedy pro přesné nastavení tlaku v membránovém motoru prostřednictvím proporcionálního redukčního ventilu. Regulace byla součástí programu v Matlabu a ventil byl řízen přes měřicí kartu (AD/DA převodník).

Hodnoty síly byly odečítány z jednotky pro zpracování signálu v kilogramech a následně po přepsání do tabulky v MS Excel přepočteny koeficientem pro gravitační zrychlení, který odpovídal poloze měření v Ostravě - Porubě. Hodnota síly byla vždy opsána jako první ihned po skončení měření, tak aby nedošlo k jejímu možnému zkreslení.



Legenda:

- 1 - zdroj tlaku
- 2 - rozváděč 3/2
- 3 - redukční ventil
- 4 - multiplikátor tlaku
- 5 - proporcionální redukční ventil
- 6 - snímač tlaku
- 7 - membránový pneumatický motor
- 8 - snímač síly
- 9 - snímač polohy
- 10 - měchový motor

Obrázek 4.1 – Schéma skutečného měřicího obvodu

Při měření nedošlo k abnormalitám, které by bylo potřeba měřit a měření proběhlo v pořádku. To bylo potvrzeno i rozumě vycházejícími křivkami závislosti zdvihu na vyvozené síle. Měření byla provedena od 6 barů při snižování o 1 bar a to na dvou membránových motorech rozdílných zdvihů a průměrů membrán jak s pružinou, tak bez pružiny. V obou případech byl motor použit jako jednočinný, kdy k zajištění pístnice došlo vlivem protitlaku měchového motoru a hmotné zátěže umístěné nad snímač síly.

K dosažení nejpřesnějšího výsledku bylo použito pro přepočet hmotnosti na vyvozující sílu hodnoty gravitačního zrychlení $g = 9,81345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, což odpovídá lokaci Ostrava.

Měření jsem prováděl společně s p. Ing. Kamilem Fojtáškem, který na podobné téma vypracovává doktorskou práci, a tak díky cenným radám a zkušenostem, které již měl z předchozích měření, proběhlo měření bez problému a v rozumném čase.

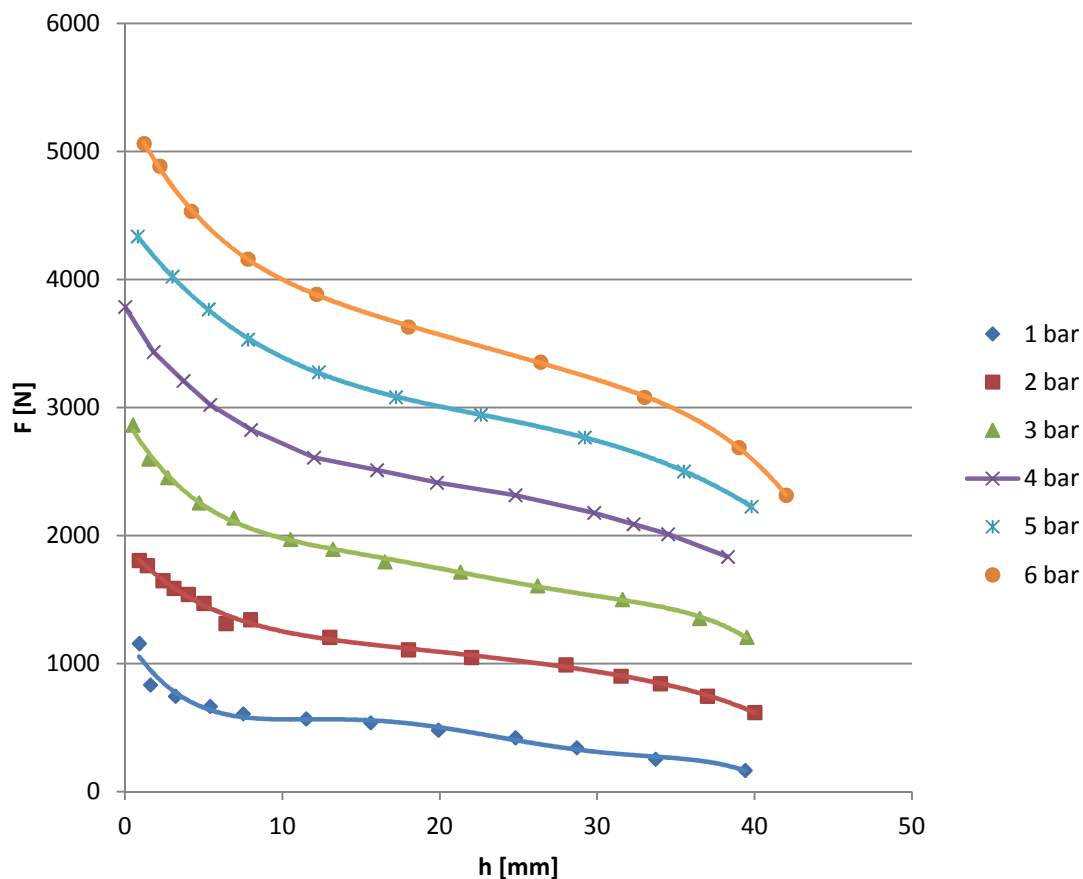
4.1. Parametry měřených motorů:

- menší motor – BOSCH REXROTH – $\varnothing 80$ - 40
 - průměr membrány – 80 mm
 - zdvih $h = 40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
 - síla pružiny - $100 \div 300 \text{ N}$
 - pracovní tlak - $2 \div 8 \text{ bar}$
 - teplota vzduchu: $-20 \div 70^\circ\text{C}$
 - materiál tělesa – ocel
 - materiál pístnice – ocel
 - materiál membrány – NBR pryž
- větší motor – BOSCH REXROTH – $\varnothing 113$ - 50
 - průměr membrány – 113 mm
 - zdvih $h = 50 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
 - síla pružiny – $100 \div 650 \text{ N}$
 - pracovní tlak – $2 \div 8 \text{ bar}$
 - teplota vzduchu $-20 \div 70^\circ\text{C}$
 - materiál tělesa – ocel
 - materiál pístnice – ocel
 - materiál membrány – NBR pryž

4.2. Naměřené charakteristiky

4.2.1. Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm s vratnou pružinou:

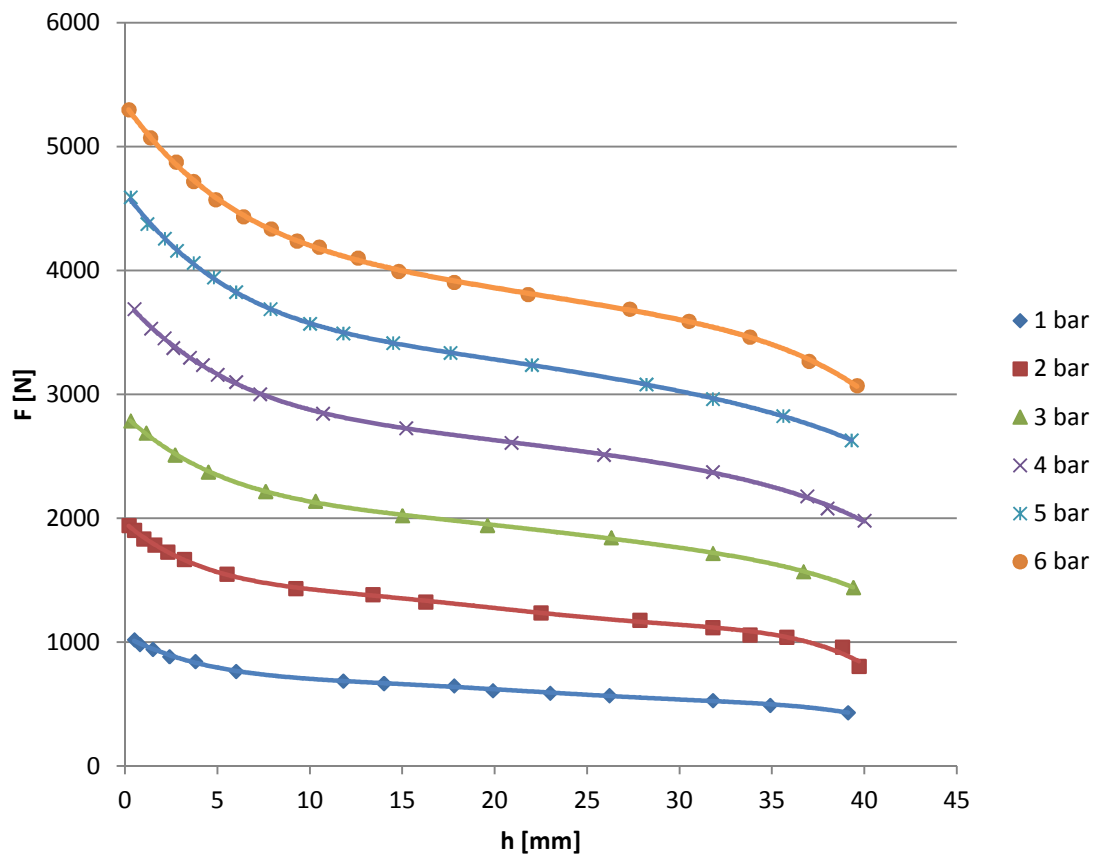
F-h charakteristika membránového motoru s pružinou o průměru membrány 80 mm



Graf 4.1 – F-h charakteristika membránového motoru s pružinou o průměru membrány 80 mm

4.2.2. Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm bez vratné pružiny:

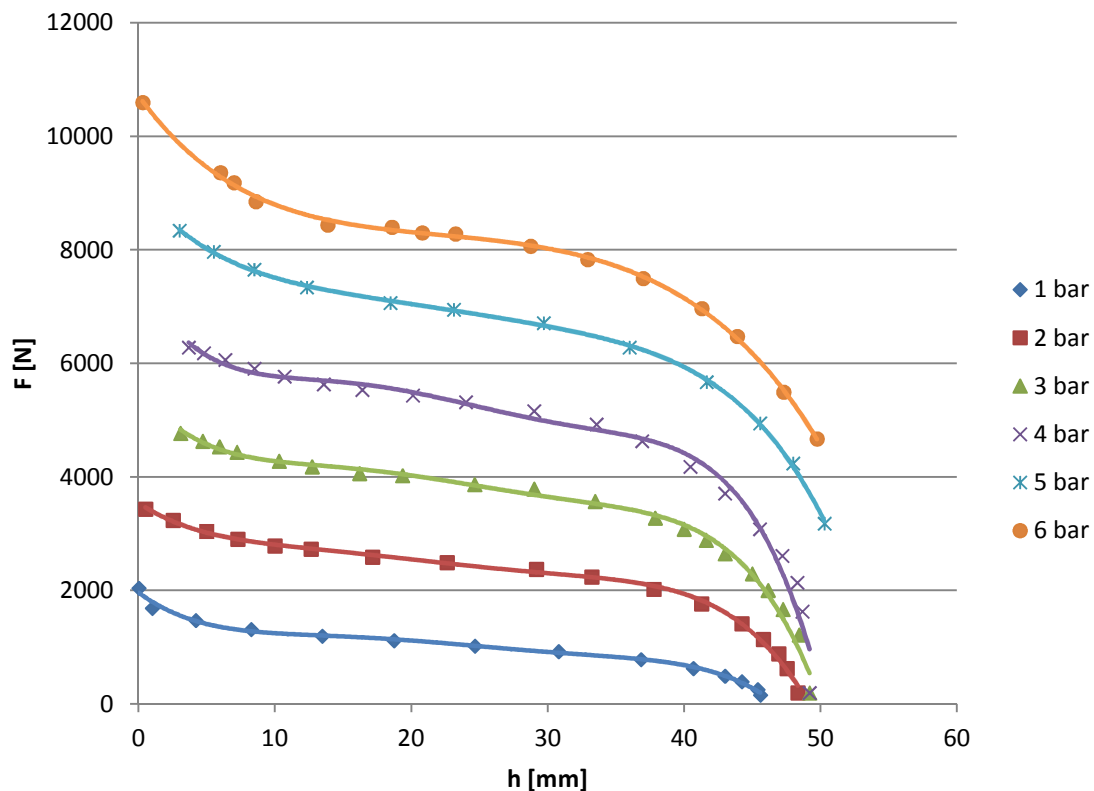
F-h charakteristika membránového motoru bez pružiny o průměru membrány 80 mm



Graf 4.2 – F-h charakteristika membránového motoru bez pružiny o průměru membrány 80 mm

**4.2.3. Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm
s pružinou:**

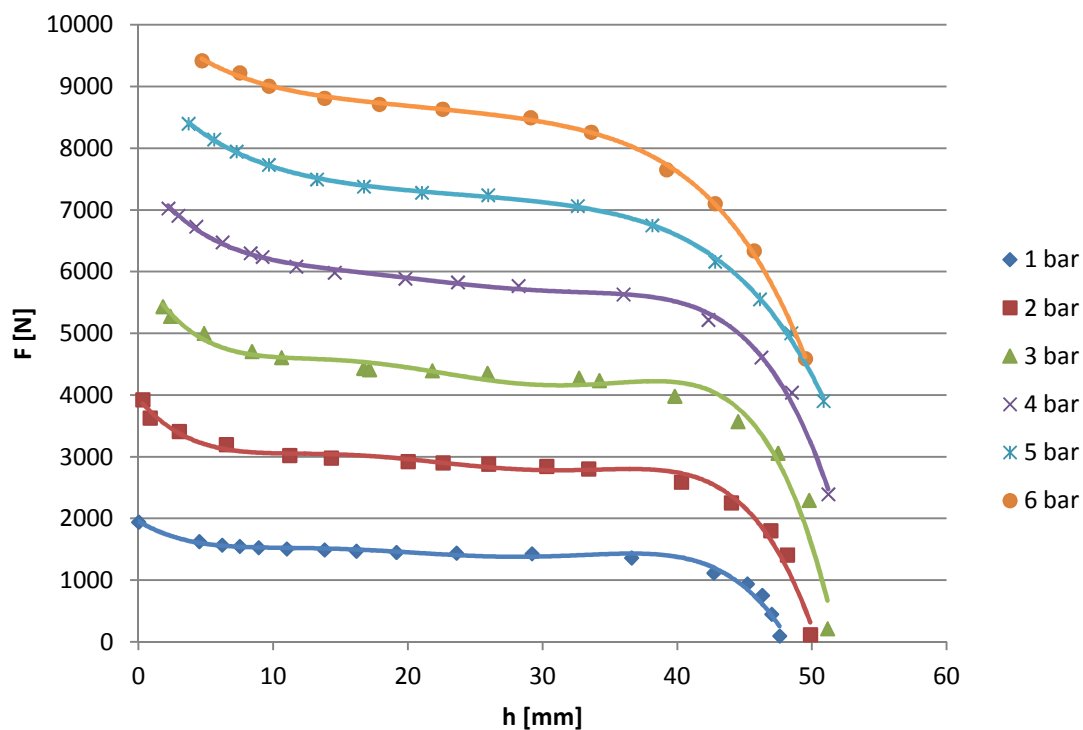
**F-h charakteristika membránového motoru s
pružinou o průměru membrány 80 mm**



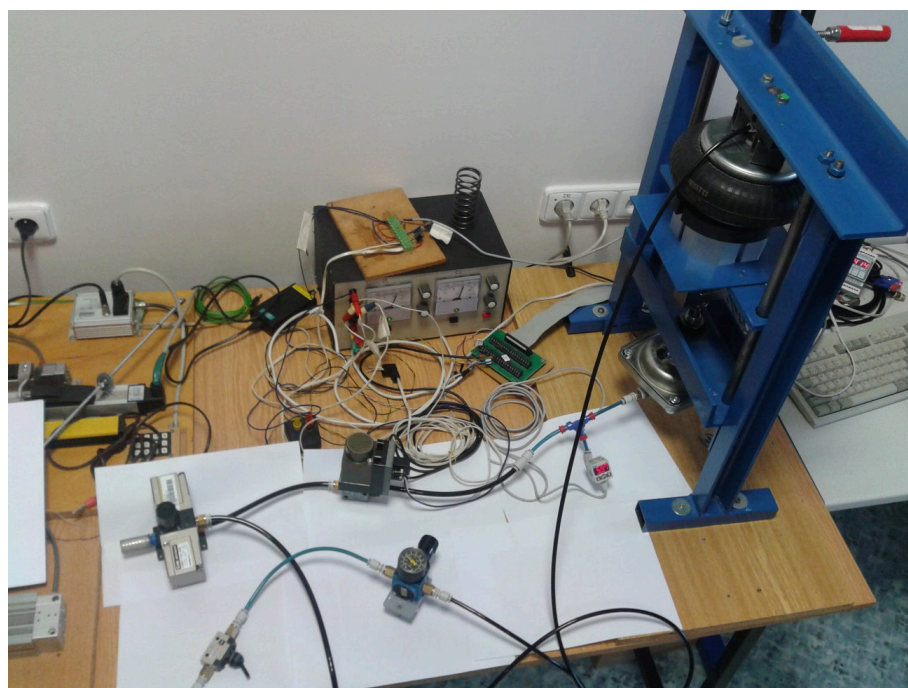
Graf 4.3 – F-h charakteristika membránového motoru s pružinou o průměru membrány 113 mm

4.2.4. Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm bez pružiny:

F-h charakteristika membránového motoru bez pružiny o průměru membrány 80 mm



Graf 4.4 – F-h charakteristika membránového motoru bez pružiny o průměru membrány 113 mm



Obrázek 4.2 – Fotografie z měření charakteristik

4.3. Teoretický vliv pružiny

V následujících grafech (graf 4.5 a 4.6) je porovnán průběh síly v závislosti na zdvihu při tlaku 0,6 MPa pro motor s pružinou a bez ní. Grafy jsou dále doplněny o teoretický průběh síly, který byl zjištěn tak, že od hodnot motoru bez pružiny byla odečtena síla pružiny vypočtená z její tuhosti. Tu jsem získal na základě dat z měření, která provedl Ing. Fojtášek.

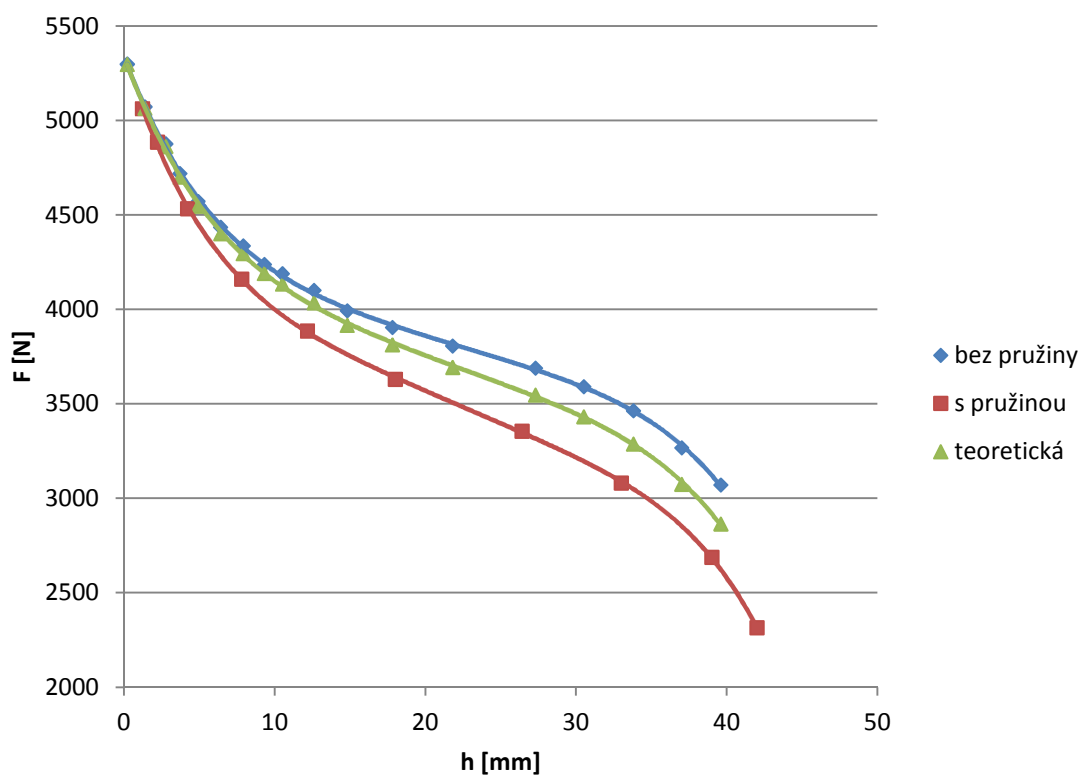
Tuhost pružiny pro motor s membránou o průměru 80 mm, $k = 5209,3 \text{ N/m}$

Tuhost pružiny pro motor s membránou o průměru 113 mm, $k = 13559 \text{ N/m}$

Z těchto grafů je jasné patrné, že měření proběhlo správně, neboť výsledná teoretická síla pružiny hlavně u většího membránového pneumatického motoru kopíruje změřenou charakteristiku s pružinou. U menšího motoru se tato teoretická síla nachází vprostřed mezi změřenými charakteristikami s pružinou a bez pružiny. Tento rozdíl přisuzuji jistému předepnutí pružiny.

4.3.1. Charakteristika pro menší membránový pneumatický motor:

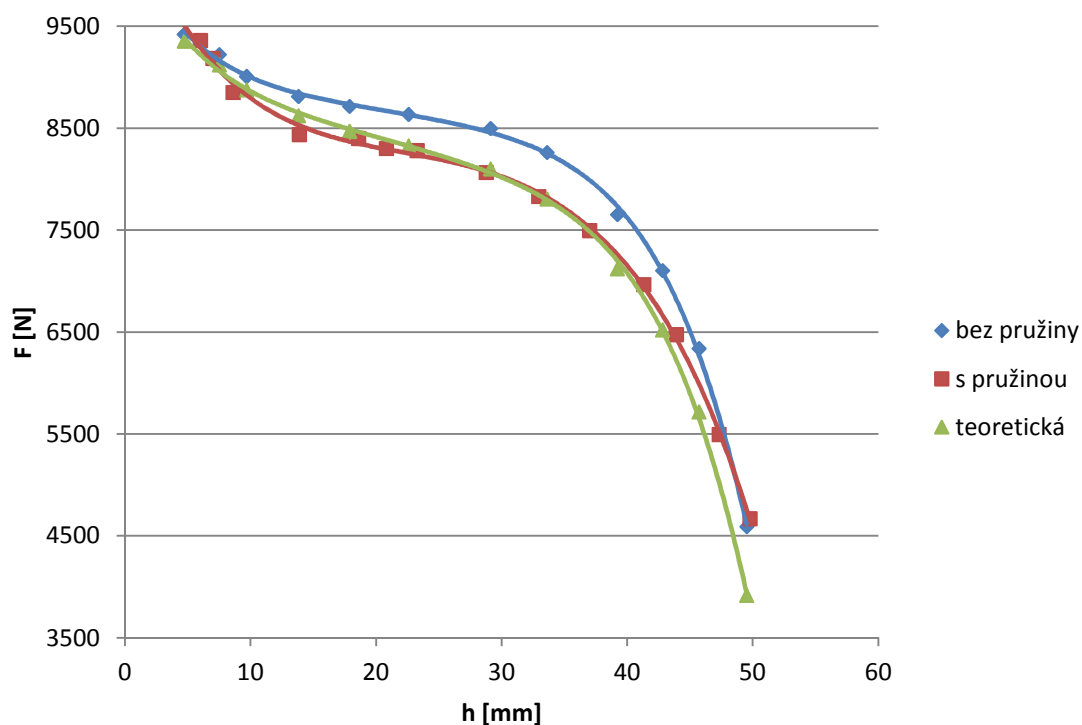
Teoretický vliv pružiny - pro motor s průměrem membrány 80mm



Graf 4.5 – F-h charakteristika teoretického vlivu pružiny na motor o průměru membrány 80 mm

4.3.2. Charakteristika pro větší membránový pneumatický motor:

Teoretický vliv pružiny - pro motor s průměrem membrány 113mm



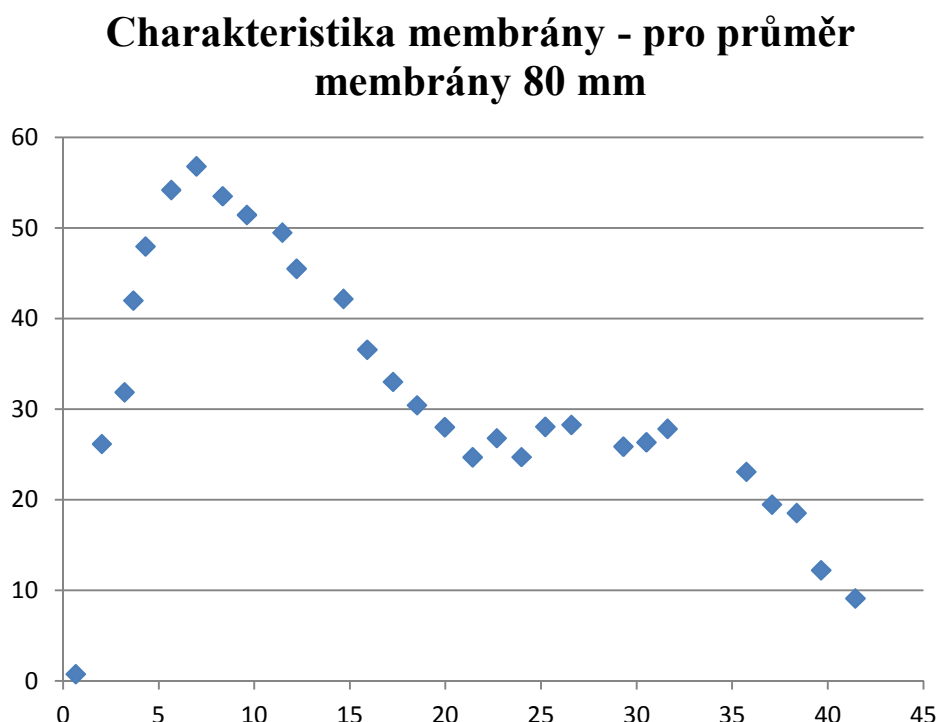
Graf 4.6 – F-h charakteristika teoretického vlivu pružiny na motor o průměru membrány 113 mm

Z grafů zobrazených výše (graf 4.5 a 4.6) je patrné, že teoretická hodnota síly pružiny vychází lépe než v případě menšího motoru. Důvodem může být, že pružina v malém motoru může být již trochu předeprnuta, což se následně projeví tímto rozdílem v grafu.

4.4.Charakteristika membrány

Pro ověření charakteristik, kdy jsem naměřil, že oba membránové pneumatické motory vykazují v závěru jejich zdvihu poměrně velké snížení vyvozuující síly, které se ve větší míře projevuje u většího motoru, jsem požádal Ing. Fojtáška, zdali by mi poskytl výsledky měření síly pro deformaci membrán. Měření bylo provedeno prostým vytahováním pístnice motoru, který byl odpojen od zdroje stlačeného vzduchu. Přitom byla zaznamenávána síla v závislosti na zdvihu.

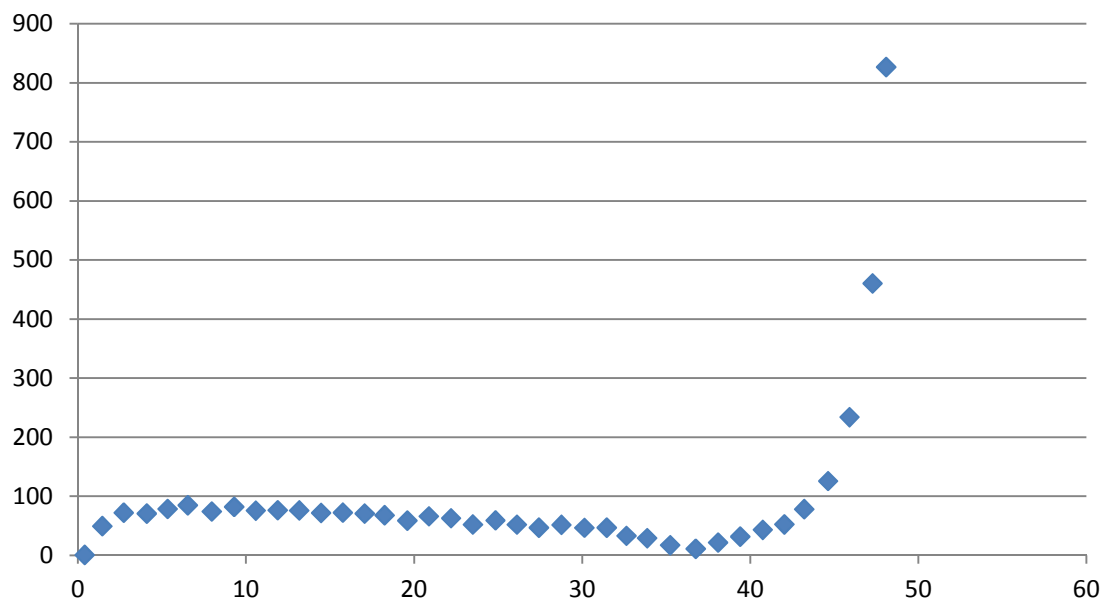
4.4.1. Charakteristika motoru o průměru membrány 80 mm:



Graf 4.7 – F-h charakteristika membrány na motor o průměru membrány 80 mm

4.4.2. Charakteristika motoru o průměru membrány 113 mm

Charakteristika membrány - pro průměr membrány 113 mm



Graf 4.8 – F-h charakteristika membrány na motor o průměru membrány 113 mm

Obě uvedené charakteristiky byly měřeny bez vratné pružiny, aby nám nezasahovala tuhost pružiny do výsledku.

V grafu pro menší motor (graf 4.7) je vidět nejprve nárůst potřebné síly pro vytažení membrány, který se potom velice výrazně sníží a velmi krátce po dosažení poloviny zdvihu motoru začíná opět růst. Tuto závislost si vysvětlují tak, že nejprve dochází k vytahování membrány, která je vyduťta na opačnou stranu a ta se po překonání určitého zdvihu (cca 7 mm) přehoupne na druhou stranu a v podstatě pístnici tímto přehoupnutím potlačí.

Z grafu pro větší motor (graf 4.8) je zřetelné, že membrána klade zpočátku též větší odpor a postupně se tento odpor zmenšuje, kdy v závěru zdvihu se od cca 43 mm začíná tato síla pro vytažení membrány velice významně zvyšovat. Tuto velikou změnu potřebné síly k vytažení pístnice si vysvětlují tak, že motor ke konci zdvihu již natahuje samotnou membránu, která je z NBR pryže. Tato pryž je zpevněna zavulkanizovanými vlákny, která kladou takto velký odpor. Při práci motoru je tedy značná část tlakové energie spotřebována na deformaci membrány a tímto lze vysvětlit významný pokles užitečné síly na konci zdvihu, jak je patrné z grafu 4.3 a 4.4. Můj osobní názor je, že

Bakalářská práce

konstrukce membrány nebyla pro zdvih 50 mm zrovna správně navrhnutá, ale že motor je spíše vhodný pro zdvih 40 mm, stejně jako menší motor, kde k tomuto abnormálnímu nárůstu potřebné síly pro vytažení membrány nedochází.

Jelikož byla membrána zatěžována pouze tahem za pístnici, může být reálná křivka charakteristiky membrány odlišná oproti křivce změřené, jelikož tlakový vzduch může deformovat membránu úplně jinak.

6. Závěr

V první části bakalářské práce jsem uvedl přehled prvků, jejichž pracovní částí je membrána a vysvětlil funkci této membrány v příslušném prvku.

Následovala část věnovaná konstrukci a charakteristikám membránových pneumatických motorů, kde jsem uvedl příklady různých konstrukcí těchto motorů s příklady jejich použití a charakteristiky dané jak konstrukcí motoru, tak tvarovým provedením membrány.

V následující části jsem provedl popis měřicího zařízení, které je dostupné na katedře, popsal zvolené snímače, včetně jejich parametrů, principu měření a navrhl zapojení měřicího obvodu ve schématu.

V poslední části, která byla věnována praktickému měření charakteristik membránových pneumatických motorů, jsem provedl tato měření. Na základě zjištění, že je nedostatečný protitlak proti motoru jsem udělal úpravu ve schématu měřicího obvodu, kdy jsem zapojil multiplikátor tlaku.

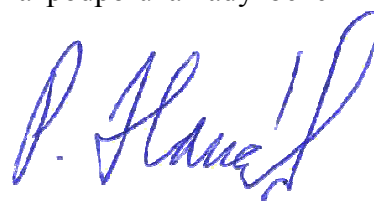
Měření proběhlo v pořádku a křivky svým tvarem a rozsahem měřených hodnot přibližně odpovídají křivkám uvedeným ve skriptech. V počátku zdvihu je vidět náhlý pokles síly, což zřejmě způsobuje, že dochází k prohýbání membrány pouze v místech, kde není podpěrný kroužek. Jakmile je tato oblast překonána hodnota vyvozující síly téměř lineárně klesá spolu se zdvihem a ke konci zdvihu je opět patrné, že výrazně klesá síla. To je zřejmě způsobeno tím, že membrána je již plně prohnuta a dochází při překonávání její tuhosti k velkým ztrátám.

Z grafů je patrné, že pružina má vzhledem k síle membránového motoru poměrně velkou tuhost, jelikož, zvláště v závěru zdvihu kdy už je pružina téměř stlačena na dosed, musí motor překonávat poměrně velkou protisílu od pružiny, čímž je omezena síla vyvozená na pístnici.

V grafech, ve kterých jsou uvedeny mnou naměřené charakteristiky je patrné, že některé hodnoty převyšují zdvih, který je dán výrobcem. Provedl jsem pro jistotu ověření správnosti naměřených výsledků a zjistil, že i v technickém listu k danému konstrukčnímu provedení je tolerance do plusových i minusových hodnot o velikosti 3 mm. Veškeré hodnoty, které překročily mezní zdvih, se vešly do dané tolerance. Tudíž jsem usoudil, že výsledky jsou správné a snímač polohy byl nakalibrován správně. To jsem přezkoušel jeho polohou v základní poloze měřeného motoru.

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Dvořákovi za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a za další důležité rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Kamilu Fojtáškově za cenné rady a pomoc při proměřování charakteristik a následné poskytnutí dat z jeho předchozích měření. Rád bych také poděkoval rodině, mé přítelkyni a kamarádům za podporu a rady během studia.

V Ostravě 16. května 2013



podpis

7. Seznam použité literatury

- [1] BEATER, P. *Pneumatic drives: systém design, modelling and kontrol*. Berlin: Springer, 2007. 323 pp. ISBN 978-3-540-69470-0
- [2] BOSCH REXROTH [online] Pneumatické motory. K nahlédnutí na WWW:
<http://www.boschrexroth.com/pneumatics-catalog/>
- [3] EAMOS [online] Membránové čerpadlo. K nahlédnutí na WWW:
http://www.eamos.cz/amos/kat_fyz/modules/
- [4] FESTO [online] Měřicí prvky (čidla). K nahlédnutí na WWW:
http://www.festo.com/cms/cs_cz/9513.htm
- [5] Format1 [online] Vážní indikátor. K nahlédnutí na WWW:
<http://format1.cz/eshopobr-dgt4an-digitalni-vazni-indikator-procesor-s-analogovym-vystupem-1345>
- [6] KOLEKTIV AUTOR“: SMC Training – *Stlačený vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. Vydání. 344s.
- [7] KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1996. 239 s. Fakulta strojní. ISBN 80-7078-306-8
- [8] KOPÁČEK, J., ŽÁČEK, M. *Pneumatická zařízení strojů*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008. 94 s. Fakulta strojní. ISBN 978-80-248-0442-2
- [9] MegaTron [online] Snímač tlaku. K nahlédnutí na WWW:
<http://www.megatron.cz/katalog-produktu/linearni-snimace-polohy/potenciometricke/>
- [10] PK servis [online] Materiál membrán. K nahlédnutí na WWW:
<http://www.pkservis.com/cz/tesneni/membrany>
- [11] PT Global [online] Snímač síly (čidlo+jednotka). K nahlédnutí na WWW:
<http://format1.cz/stranka-pt4000-268>
- [12] Slavík, Václav. *Bakalářská práce: Zkušební zařízení a metodika měření pro membránový pneumomor*, 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011. 40 s.
- [13] SMC [online] Snímač tlaku. K nahlédnutí na WWW:
<https://catalog.smc-cee.com/default.aspx?go=CZ:2:7:121&cc=1>

8. Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Zpětný ventil [6]	10
Obrázek 1.2 – Redukční ventil [6]	10
Obrázek 1.3 – Redukční ventil [6]	11
Obrázek 1.4 – Rychlo odvětrávací ventil [6]	11
Obrázek 1.5 – Servoventil s charakteristikou [6]	12
Obrázek 1.6 – Membránové čerpadlo [3]	12
Obrázek 1.7 – Membránový kompresor [3]	13
Obrázek 1.8 – Elektropneumatický převodník [3]	13
Obrázek 2.1 – Řez membránového motoru s charakteristikou [8,1]	14
Obrázek 2.2 – Rozmontovaný membránový pneumatický motor	14
Obrázek 2.3 – Řez membránovým pneumatickým motorem s podpěrnou deskou [1]	15
Obrázek 2.4 – Řez membránovým pneumatickým motorem s podpěrným pístem [1]	16
Obrázek 2.5 - Jednotlivé tvary provedení membrán [12]	17
Obrázek 2.6 – F-h charakteristika [1]	18
Obrázek 2.7 – Náskres k základním výpočtům [8]	19
Obrázek 2.8 – Charakteristiky různých tvarů membrán [8]	20
Obrázek 2.9 – Graf závislosti pasivního odporu na rychlosti [8]	22
Obrázek 2.10 – Náskres pro výpočet geometrického objemu [8]	23
Obrázek 3.1 – Katalogový list BOSCH-REXROTH [2]	25
Obrázek 3.2 – Schéma návrhu měřicího obvodu	27
Obrázek 3.3 – Snímač tlaku SMC [13]	28
Obrázek 3.4 – Snímač síly PT 4000 [11]	29
Obrázek 3.5 – Vážní indikátor s analogovým výstupem [5]	29
Obrázek 3.6 – Snímač dráhy MegaTron RC13-100-M [9]	30
Obrázek 3.7 – Schéma alternativního provedení měřicího obvodu	31
Obrázek 4.1 – Schéma skutečného měřicího obvodu	33
Obrázek 4.2 – Fotografie z měření charakteristik	38